

PROYECCIÓN DE LA ACTIVIDAD CICLÓNICA FUTURA BASADA EN PATRONES SINÓPTICOS DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Javier DÍEZ, Antonio ESPEJO,
Fernando J. MENDEZ, Manuel DEL JESUS, Jorge PÉREZ, Iñigo J. LOSADA
Instituto de Hidráulica Ambiental “IH Cantabria” Universidad de Cantabria, España
javier.diez@unican.es, antonio.espejo@unican.es, fernando.mendez@unican.es,
manuel.deljesus@unican.es, jorge.perezgarcia@unican.es, losadai@unican.es

RESUMEN

La inundación así como otros efectos derivados de los ciclones tropicales (TCs) suponen hoy en día uno de los mayores riesgos naturales en las zonas costeras, afectando gravemente a las zonas bajas y altamente pobladas de las latitudes medias del planeta. En los últimos años se han producido varios eventos catastróficos como el Katrina en el 2005 o el Haiyan en el 2013 con importantes pérdidas tanto humanas como económicas. Estas graves consecuencias evidencian la necesidad de estudiar los *drivers* condicionantes de la actividad ciclónica con el objetivo de predecir cambios potenciales en el futuro.

Existen una serie de condiciones climáticas favorables para la génesis y desarrollo de los TCs: una elevada temperatura superficial del mar (SST), la baja o moderada cizalladura vertical del viento o elevados valores de humedad en el aire. El presente estudio se centra en el papel de la SST como uno de los forzamientos más importantes para explicar la variabilidad estacional e interanual de la actividad ciclónica.

Nuestro estudio está enfocado a caracterizar la relación existente entre las situaciones sinópticas de SST (predictor) y la actividad ciclónica (predictando) mediante la utilización de técnicas de minería de datos (*data mining*). Una vez establecida la relación entre el predictor y el predictando y disponiendo de las proyecciones futuras de la SST mediante modelos generales de circulación (GCMs) pueden estimarse los cambios esperados en la actividad ciclónica.

En este trabajo se muestran algunos ejemplos de aplicación de esta metodología para los huracanes del Atlántico Norte.

Palabras clave: Cambio climático, ciclones tropicales, *downscaling* estadístico, temperatura superficial del mar.

ABSTRACT

Flooding and other effects of tropical cyclones (TCs) represent one of the major natural hazards in coastal areas, severely affecting low-lying and highly populated mid-latitude areas of the planet. In recent years there have been several catastrophic events like Katrina in 2005 and Haiyan in 2013 with important human and economic losses. These serious consequences motivate the need to study the drivers of cyclonic activity in order to predict potential changes in the future.

There are favorable weather conditions for the genesis and development of TCs such as: high sea surface temperature (SST), low to moderate vertical wind shear or high levels of humidity

in the air. This study is focused on the role of SST as one of the most important forcings to explain the seasonal and interannual variability of hurricane activity.

Our study is focused on characterizing the relationship between the synoptic situations of SST (predictor) and cyclonic activity (predictand) using data mining techniques. Once the relationship between predictor and predictand is established and having the future projections of SST, by means of general circulation models (GCMs), changes in hurricane activity can be estimated.

Some examples of the methodology are shown for the North Atlantic hurricanes.

Keywords: Climate change, tropical cyclones, statistical downscaling, sea surface temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales se encuentran entre los fenómenos naturales más devastadores del planeta. Recientes eventos con consecuencias catastróficas han suscitado la necesidad de desarrollar metodologías para estimar los impactos económicos y humanos asociados a los TCs bajo distintos escenarios de cambio climático. (Mendelshon *et al.* 2012, Peduzzi *et al.* 2012).

La SST en el Atlántico Norte (NA) se incrementó en las últimas décadas debido en gran parte al efecto invernadero (Santer *et al.* 2006). Es conocido que la intensidad de los TCs es muy sensible a la SST, la cual determina principalmente la energía superficial (calor latente) transferida desde el océano a la atmósfera. Emanuel (2005, 2007) encontró una alta correlación entre la SST del NA y la duración, frecuencia e intensidad de las tormentas. Otros estudios apuntan a que la estructura espacial de la SST es más importante que los valores absolutos (Vecchi and Soden 2007; Vecchi *et al.* 2008; Villarini *et al.* 2010; Ramsay and Sobel 2011; Villarini y Vecchi, 2012). Además, recientes publicaciones muestran una migración en dirección a los polos de la localización de la máxima intensidad de los ciclones debido posiblemente a la expansión tropical como consecuencia del cambio climático (Kossin *et al.*, 2014).

El presente estudio trata de estimar los posibles cambios en la intensidad, trayectorias y frecuencias de los ciclones en el NA a través de las proyecciones de las SST estimadas por los GCMs pertenecientes a la quinta fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). Para ello, se utiliza una metodología basada en técnicas de *downscaling* estadístico con el objetivo de caracterizar la relación existente entre las situaciones sinópticas de SST (predictor) y la actividad ciclónica (predictando).

2. METODOLOGÍA

2.1 Bases de datos

Con el propósito de establecer nuestro predictor se han utilizado los datos mensuales de SST en el periodo 1854-2013 de la base de datos de la NOAA: Extended Reconstruction Sea Surface Temperature versión 3b (ERSSTv3b, Smith *et al.*, 2003). El dominio espacial utilizado se encuentra entre las coordenadas 100°W y 10°W y entre 0°N y 45°N y está formado por una malla regular de 2 grados de resolución. Debido a la dependencia existente entre el déficit de presión de los TCs y la SST subyacente, usamos una transformación de la

SST a la que hemos llamado Sea Surface Temperature Index (ISST). Esta permite optimizar la información utilizada como input en el algoritmo de clasificación. Para obtener dicha transformada se relacionan la presión y la SST interpoladas horariamente a lo largo de la traza de todos los ciclones tropicales del NA. La figura 1 muestra, mediante puntos azules, la relación existente entre los valores de SST y el déficit de presión ($P_{deficit} = P_{ambiente} - P_{centro\ perturbación}$), y entre la SST y los valores de ISST normalizados de 0 a 1. Estos últimos han sido obtenidos a través del ajuste de la envolvente representada mediante una línea roja. Es posible apreciar como para valores de ISST cercanos a 0 corresponden temperaturas de SST por debajo o por encima de los 20 y 31 grados Celsius respectivamente. En dichos intervalos la actividad ciclónica es prácticamente nula. Asimismo, para temperaturas comprendidas entre 26 y 29 °C, cuando existe un mayor número de eventos y sus intensidades son mayores, los valores de la ISST son cercanos a 1. Por lo tanto, el índice ISST tiene como objetivo capturar aquellas situaciones en las cuales la actividad ciclónica es más elevada.

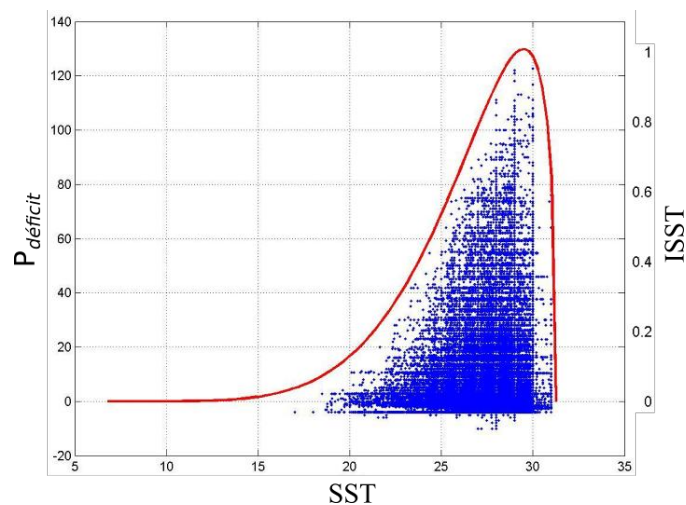


Fig. 1: SST versus déficit de presión y SST versus ISST.

La base de datos de ciclones utilizada es la IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship; Knapp *et al.* 2010). Entre todas las bases de datos existentes la IBTrACS contiene el registro más completo de TCs al disponer de información de varios centros e incluye información de la presión (mb) y posición cada 6 horas en el centro de la perturbación durante el periodo 1842-2013. Para realizar un análisis más riguroso se han interpolado horariamente los datos mediante el método descrito por Elsner y Jagger (2012). Además, se han utilizado únicamente aquellos ciclones comprendidos en el periodo 1982-2012 ya que hasta la aparición de los satélites meteorológicos geostacionarios a mediados de los 70 existían considerables incertidumbres en las medidas globales de la actividad ciclónica.

Para predecir los cambios de las SST en los periodos de estudio 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 se han seleccionado cinco GCMs del CMIP5 mediante la metodología propuesta por Perez *et al.*, (2014). Estos modelos son: CanESM2 del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada), CCSM4 del National Center for Atmospheric Research (USA), CESM1(BGC) del Community Earth System Model Contributors (USA), y también el CMCC-CM y el CMCC-CMS del Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italy). Los escenarios escogidos para realizar el estudio han sido el RPC4.5 y el RCP8.5 pertenecientes al CMIP5 (Moss *et al.*, 2010).

2.2 Downscaling estadístico – Modelo de regresión

El propósito de utilizar técnicas de minería de datos es el de calibrar un modelo de regresión no lineal. Así, conociendo las variables independientes (en este caso las SST) es posible determinar la respuesta de la variable dependiente o actividad ciclónica.

Los ciclones tropicales necesitan una SST determinada para formarse y desarrollarse, (Gray, 1968, 1979, 1985), por lo que cabe esperar que con un determinado campo espacial de SST se produzca una actividad ciclónica concreta. Para establecer dicha relación se han utilizado técnicas de clasificación no lineales con las cuales es posible diferenciar patrones sinópticos de SST y vincularlos a una respuesta o anomalía climática específica como en este caso hacemos con la actividad ciclónica.

Hoy en día es posible encontrar una amplia variedad de algoritmos de clasificación en el campo de la minería de datos. Conceptualmente todos ellos se basan en localizar una serie de grupos representativos de toda la muestra con la máxima disimilitud entre ellos y se diferencian en el método de determinar las distancias y las relaciones de vecindad impuestas. Algunos de los métodos más utilizados como el algoritmo k-means (Hastie *et al.*, 2001) y los mapas de redes auto-organizativas (Kohonen, 2000) han sido utilizados para diferenciar campos espaciales de diferentes variables geofísicas (Gutiérrez *et al.*, 2005; Reusch *et al.*, 2007; Polo *et al.*, 2011; Izaguirre *et al.*, 2012; Guanche *et al.*, 2013; Espejo *et al.*, 2014).

Por lo tanto, con el propósito de encontrar patrones sinópticos de ISST en el NA, se ha aplicado el algoritmo de clasificación k-means inicializado con el método de máxima disimilitud (Camus *et al.*, 2011). Para lograr un mejor resultado a la hora de aplicar la técnica de clasificación k-means se han transformado previamente los campos espaciales de ISST en una serie de modos espaciales y temporales usando el análisis de componentes principales (PCA). De esta forma, es posible obviar la información redundante que posiblemente exista en las distintas componentes de los espacios de alta dimensionalidad. La técnica PCA permite reducir la dimensionalidad de una muestra de datos mediante la proyección en un nuevo espacio de menor dimensión conservando el máximo de la varianza de los datos.

Como resultado de aplicar dicha metodología se obtiene una serie de centroides o patrones sinópticos de ISST, cada uno representado por un prototipo y formado por los datos a los cuales el prototipo es más cercano (Hastie *et al.*, 2001). Los datos están compuestos por $N = 159 \times 12 = 1908$ campos de ISST mensuales, $\{ISST(x, t_1), ISST(x, t_2), \dots, ISST(x, t_N)\}$, donde x representa cada punto con información en el océano NA (malla de 1058 puntos) y t es el tiempo en meses (t_1 es el primer mes, enero de 1984, y t_N es el último mes, diciembre del 2013). Antes de realizar la clasificación, se aplica PCA capturando los n primeros modos que explican el 95% de la varianza ($n = 11$ en este trabajo), obteniendo los autovectores de la función ortogonal, $\{EOF_1(x), EOF_2(x), \dots, EOF_N(x)\}$, y sus amplitudes temporales asociadas, o componentes principales, $\{PC_1(t), PC_2(t), \dots, PC_N(t)\}$. En segundo lugar, se implementa el algoritmo k-means a los N datos multivariados (n -dimensiones), $\{PC_1(t), PC_2(t), \dots, PC_N(t)\}; t=1, \dots, N$; obteniendo M grupos de patrones sinópticos de ISST definidos por el prototipo o centroide para cada k^{th} -cluster, $ISST_k = \{PC_{1,k}(t), PC_{2,k}(t), \dots, PC_{N,k}(t)\}; k=1, \dots, M$. Después, considerando los modos espaciales (EOFs) correspondientes a cada PC, los centroides son expresados en el espacio original para el k^{th} -cluster como $ISST_k(x) = \{EOF_1 PC_{1,k}(t) + EOF_2(x) PC_{2,k}(t) + \dots + EOF_N PC_{N,k}(t)\}; k=1, \dots, M$. En este

trabajo se han usado $M = 16$ centroides, con un promedio de 149 elementos representados por cada uno.

Una vez obtenidos los 16 patrones sinópticos, se busca el centroide más cercano a cada campo de ISST mensual utilizando el criterio de mínima distancia. De esta manera se obtiene un vector con una longitud de N elementos, cada uno de ellos representado por uno de los M patrones sinópticos seleccionados. Mediante dicho vector de datos resulta sencillo asociar los ciclones que tuvieron lugar en cada uno de los 16 patrones sinópticos. Para ello, se identifica la fecha en la que el ciclón alcanzó su menor presión y se correlaciona con el grupo de ISST correspondiente. La figura 2 muestra los mapas de los 16 patrones sinópticos ordenados según la distribución espacial de la ISST. Dicha distribución espacial varía según el grupo en el que nos encontremos y muestra una gran correlación con la actividad ciclónica (ver figura 3). Existen ciertos grupos como el 4, donde el valor de ISST en gran parte de la zona del Caribe y del Atlántico es muy cercano a 1. Esto quiere decir que en dicho grupo se alcanza una ISST favorable para una elevada actividad ciclónica.

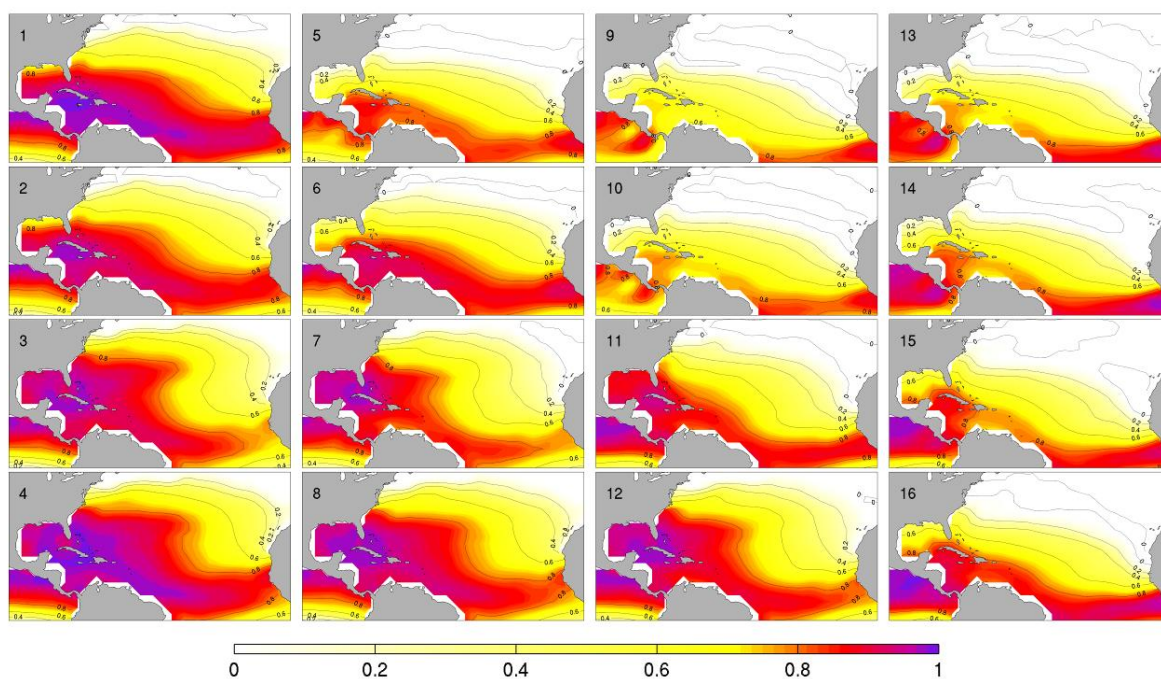


Fig. 2: 16 patrones sinópticos de ISST. La barra de colores corresponde a la magnitud de la ISST, siendo 1 el valor donde es más probable que se dé una elevada actividad ciclónica.

Para representar correctamente la frecuencia, intensidad y trayectorias de los huracanes se ha dividido el campo espacial mediante una malla hexagonal sobre la proyección Mollweide. Esto garantiza que cada hexágono cubra un área con unas dimensiones homólogas, de unos 100.000 km² (ver Elsner *et al.*, 2012). La figura 3 muestra la actividad ciclónica correspondiente a cada grupo de ISST. La gama de colores azules indica el número de ciclones cuya trayectoria atraviesa cada hexágono de mayor tamaño desde 1982 hasta 2012. Mientras que la gama de rojos indica el número de dichos ciclones cuya categoría es mayor o igual a 3 según la escala Saffir-Simpson. Como puede apreciarse comparando las figuras 2 y

3, los grupos con un índice mayor de ISST (grupos 1, 3, 4, 8, y 12) corresponden a aquellos donde la actividad ciclónica es más intensa.

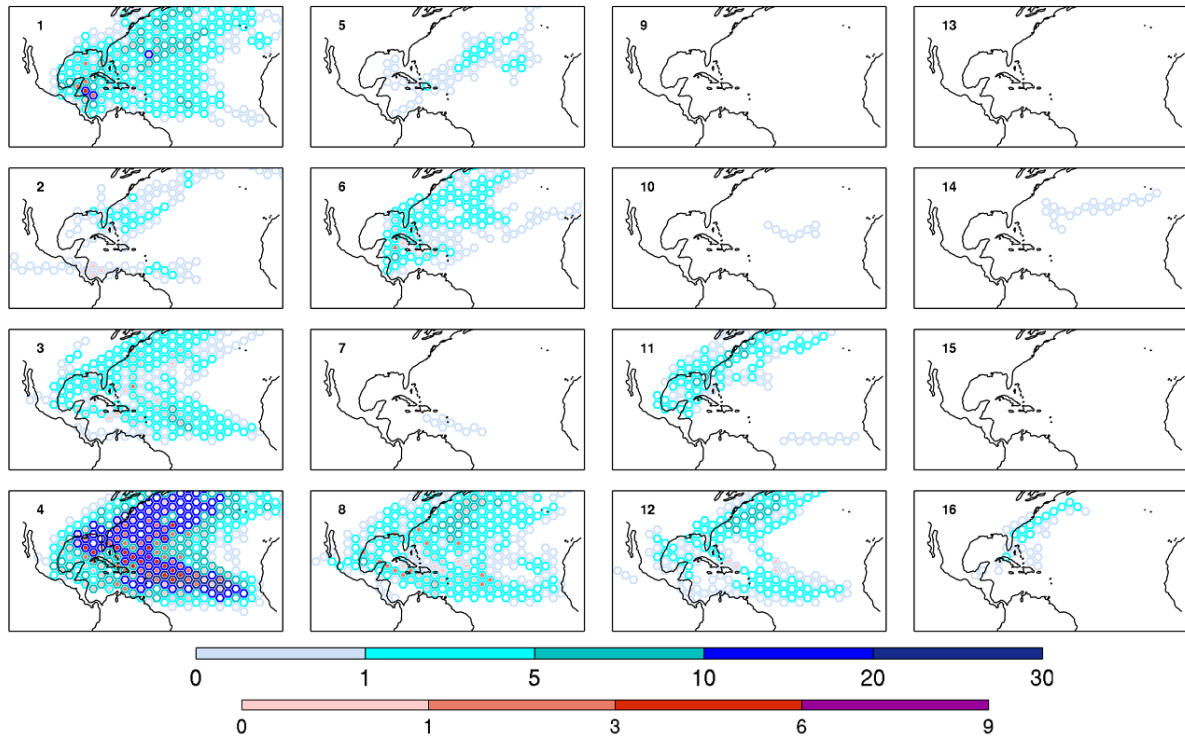


Fig. 3: Actividad ciclónica asociada a los 16 patrones sinópticos de ISST seleccionados. La gama de colores azules indica el número de ciclones cuya trayectoria atraviesa cada hexágono desde 1982 hasta 2012. La gama de rojos indica el número de dichos ciclones cuya categoría es mayor o igual a 3 según la escala Saffir-Simpson.

Los grupos de ISST muestran tendencias y patrones de estacionalidad muy claros como muestra la figura 4. Aquellos grupos con un mayor número de ciclones como el 1, 3, 4, 8 y 12 corresponden a los meses comprendidos desde junio hasta octubre, coincidiendo con la temporada de ciclones en el NA. Es importante destacar que la probabilidad de ocurrencia anual de los patrones sinópticos difiere considerablemente y, por lo tanto, su actividad ciclónica asociada también. Además, la frecuencia de ocurrencia de determinados grupos como el 9, el 15, o el 2 con una actividad ciclónica concentrada en latitudes medias está disminuyendo durante los últimos años. Por el contrario, en otros grupos como el 1, 4, 6, o el 16 con una mayor actividad ciclónica en latitudes altas, dicha frecuencia de ocurrencia está aumentando considerablemente.

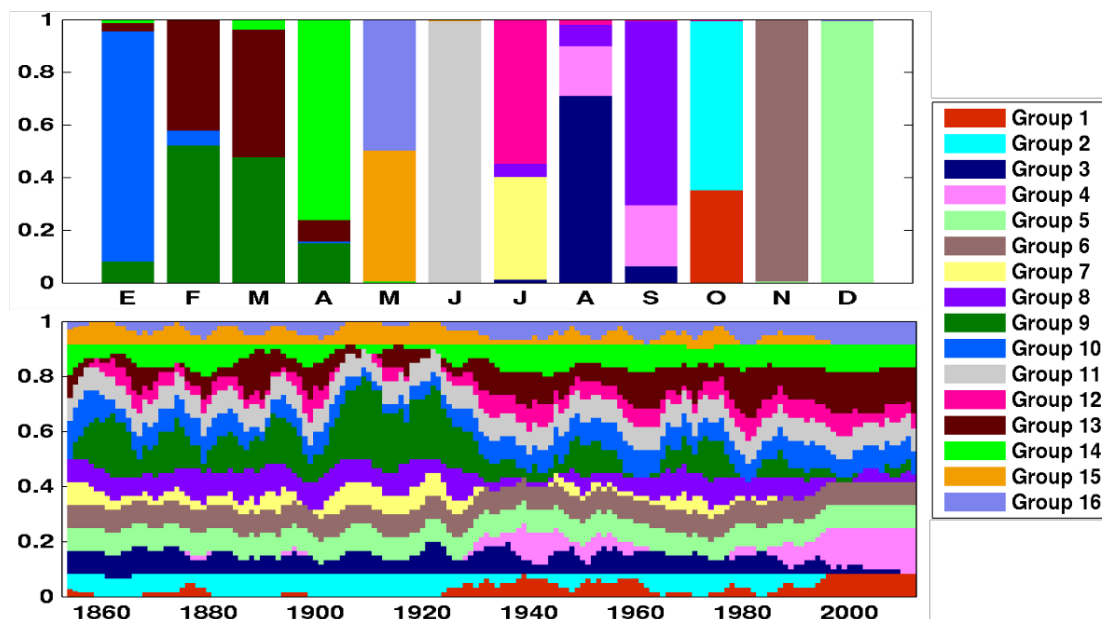


Fig. 4: Estacionalidad (panel superior) y probabilidad de ocurrencia anual (panel inferior) tras haber aplicado una media móvil de cinco años para los 16 patrones sinópticos.

2.3 Cambio climático

Los GCMs son modelos matemáticos capaces de simular la evolución atmosférica ante distintos escenarios de cambio climático. Se ha evaluado la calidad de dichos modelos, pertenecientes al CMIP5, para los distintos patrones sinópticos de SST siguiendo la metodología propuesta por Perez *et al.*, (2014). Para ello, se han comparado las probabilidades de ocurrencia de los 16 grupos seleccionados con los resultados de los diferentes GCMs en el periodo control 1971-2000. De esta forma, se han elegido los 5 modelos que mejor simulan la variabilidad sinóptica a través de su error cuadrático medio. Las probabilidades de ocurrencia de los diferentes grupos de SST son idénticas a las obtenidas en la clasificación de ISST, estando cada patrón sinóptico de SST formado por la media de los campos espaciales de SST que tuvieron lugar durante dichas fechas.

El objetivo del presente apartado es conocer las nuevas probabilidades de ocurrencia de los 16 patrones sinópticos de SST para los modelos seleccionados y para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en los periodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Con este propósito se han comparado los campos de SST obtenidos de las simulaciones de los GCMs con los grupos de SST calculados, asignando a cada campo mensual el tipo de tiempo más parecido obtenido en la clasificación mediante su mínimo error cuadrático. De esta manera se calcula el aumento o disminución en la frecuencia de ocurrencia de los grupos de SST respecto al periodo de control.

La figura 5 muestra la actividad ciclónica para el periodo 1982-2012. Mientras que la figura 6 muestra la tasa de variación en número de ciclones al año respecto al periodo actual (1982-2012) para los diferentes escenarios y periodos propuestos. Dicha tasa se ha calculado a partir de la actividad ciclónica asociada a la media de los resultados obtenidos por los 5 modelos seleccionados. Como se puede observar en la figura 6, los resultados muestran una gran variabilidad espacial. Los dos escenarios propuestos pronostican un aumento en la frecuencia de ocurrencia e intensidad de los ciclones en casi toda la zona de estudio, disminuyendo esta última en algunas zonas como al Norte de Venezuela. Por otro lado, en gran parte de la costa

Este de Norteamérica, como es el caso de Nueva York (panel inferior derecho), los resultados obtenidos determinan un aumento de aproximadamente 0.4 ciclones al año. Mientras, en otras zonas, como Nueva Orleans, en el Golfo de México, el incremento es mucho menor, de aproximadamente 0.16 ciclones al año. Sin embargo, en este último caso, el número de ciclones con categoría mayor o igual a 3, según la escala Saffir-Simpson, aumentará en 0.1 ciclones al año (panel inferior derecho). Esto quiere decir que no se aprecia ninguna relación entre el incremento en la frecuencia total de ciclones y la intensificación de los mismos en número de ciclones al año.

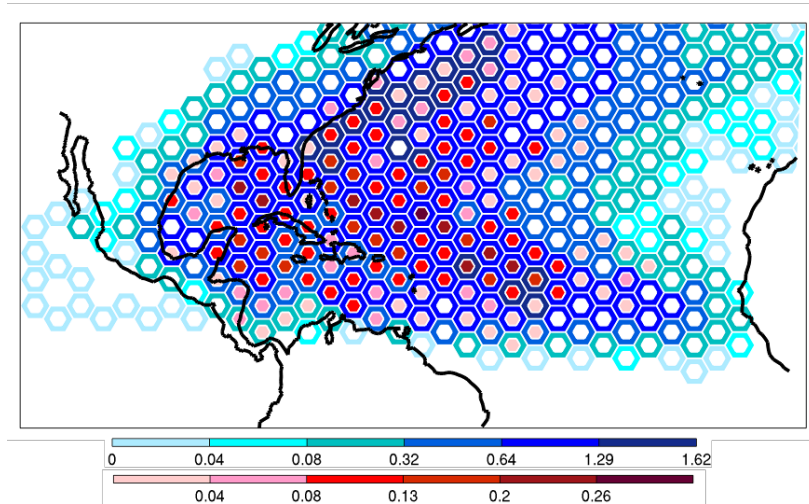


Fig. 5: Actividad ciclónica en el periodo 1982-2012. La gama de colores azules indica el número de ciclones al año cuya trayectoria atraviesa cada hexágono desde 1982 hasta 2012. La gama de rojos indica el número de dichos ciclones al año cuya categoría es mayor o igual a 3 según la escala Saffir-Simpson.

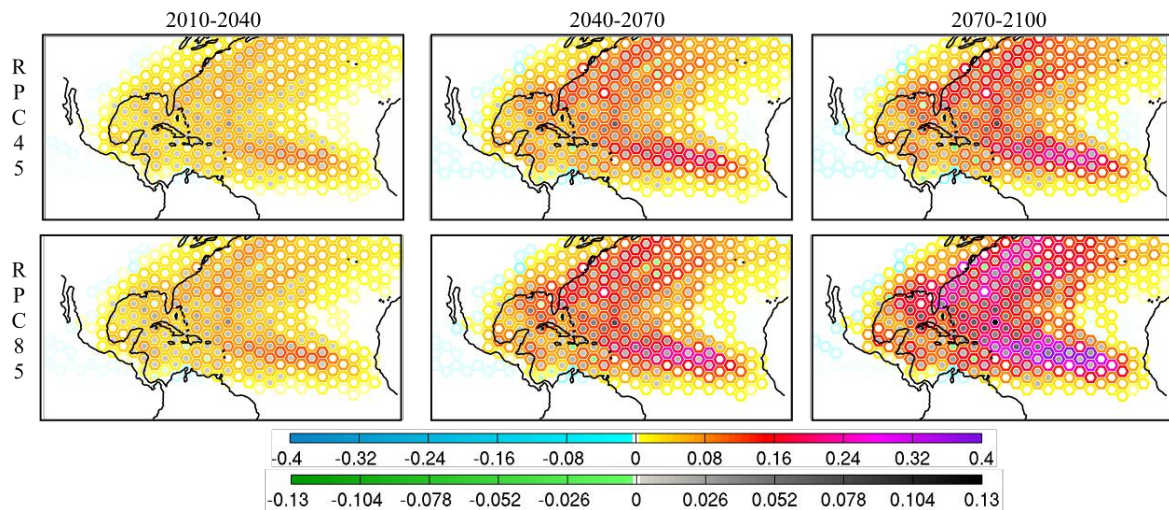


Fig. 6: Proyección de la actividad ciclónica para los periodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 para los escenarios RPC4.5 y RPC8.5 a partir de la media de los resultados obtenidos por los 5 GCMs seleccionados. La gama de colores azul-morado indica el aumento o disminución en número de ciclones al año respecto al periodo de control 1982-2012. La gama de colores verde-negro, indica dicha tasa de variación para los ciclones cuya categoría es mayor o igual a 3 según la escala Saffir-Simpson.

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado mediante la metodología propuesta que es posible encontrar patrones sinópticos de SST y relacionarlos a una actividad ciclónica determinada. Además, apoyándonos en proyecciones de SST obtenidas mediante GCMs, se pueden estimar cambios futuros en dicha actividad ciclónica. Para ello se usan las nuevas probabilidades de ocurrencia de los diferentes patrones sinópticos de SST para diferentes escenarios de cambio climático.

Los resultados obtenidos confirman la conexión existente entre la SST y la actividad ciclónica. Por otro lado, su migración hacia latitudes más elevadas (Kossin *et al.*, 2014) no queda del todo justificada utilizando la SST como único forzamiento. Cabe destacar que la existencia de unos valores determinados de SST o ISST en este caso, no es el único condicionante necesario para explicar la génesis y desarrollo de los ciclones. Otras variables como la cizalladura del viento, la humedad o la vorticidad ciclónica también son indispensables y podrían ser incorporadas para obtener conexiones más evidentes.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto iMar21 (CTM2010-15009) del gobierno español. Los autores queremos agradecer a los grupos modeladores que han generado los datos utilizados y a la Earth System Grid Federation (ESGF) por facilitar el acceso a ellos.

5. REFERENCIAS

- Camus, P., Méndez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S. (2011). *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate*. Coastal Eng., 58, 453–462, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003.
- Elsner, J.B., Jagger, T.H. (2012): Hurricane Climatology. *A Modern Statistical Guide Using R*. Oxford University Press, 2013, 380pp.
- Elsner, J.B., Hodges, R.E., y Jagger, T.H. (2012). *Spatial grids for hurricane climate research*. Climate dynamics 39 (1-2), 21-36, 10.
- Emanuel, K. (2005). *Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years*. Nature, 436, 686-688.
- Emanuel, K. (2007). *Environmental factors affecting tropical cyclone power dissipation*. Journal of Climate, 20, 5497-5509.
- Espejo, A., Camus, P., Losada, I.J., Méndez, F.J. (2014). *Spectral ocean wave climate variability based on circulation patterns*. J. Phys. Oceanogr. doi: 10.1175/JPO-D-13-0276.1
- Gray, W.M. (1968). *Global view of the origin of tropical disturbances and storms*. Mon. Wea. Rev., 96, 669–700.
- Gray, W.M. (1979). *Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation*. Meteorology Over the Tropical Oceans., Shaw, D., Ed., RMS, James Glaisher House, pp. 155–218.
- Gray, W.M. (1985). Tropical cyclone global climatology. WMO Technical Document WMO/TD-No. 72, Vol. I, WMO, Geneva, Switzerland, 3–19.
- Guanche, Y., Mínguez, R., Méndez, F.J. (2013). *Autoregressive logistic regression applied to atmospheric circulation patterns*. Climate Dynamics <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1690-3>.

- Gutiérrez, J.M., Cano, R., Cofiño, A.S., Sordo, C. (2005). *Analysis and downscaling multi-model seasonal forecast in Peru using self-organizing maps*. Tellus 57A, 435–447.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2001). *The Elements of Statistical Learning*. Springer, New York.
- Izaguirre, C., Menendez, M., Camus, P., Méndez, F.J., Minguez, R., Losada, I.J. (2012). *Exploring the interannual variability of extreme wave climate in the northeast atlantic ocean*. Ocean Modelling, 59–60:31–40.
- Knapp, K.R., Kruk M.C., Levinson D.H., Diamond H.J., Neumann C.J. (2010). *The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)*. Bulletin of American Meteorological Society, vol. 91, pp.363-376, 2010.
- Kohonen, T. (2000). Self-organizing Maps, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin Press.
- Kossin J. P., Kerry A. Emanuel, K., Gabriel A.V. (2014). *The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity*. Vol 509. Nature 349.
- Mendelsohn, R., Emanuel, K., Chonabayashi, S., Bakkensen, L. (2012). *The impact of climate change on tropical cyclone damage*. Nature Climate Change, 2, 205-209.
- Moss, R.H. and co-authors (2010). *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature, 463(7282), 747–56. doi:10.1038/nature08823.
- Peduzzi, P. and co-authors (2012) Tropical cyclones: global trends in human exposure, vulnerability and risk. Nature Clim. Change 2, 289-294.
- Perez, J., Menendez, M., Mendez, F.J., Losada, I.J. (2014). *Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region*. Clim Dyn. DOI 10.1007/s00382-014-2078-8.
- Polo, I., Ullmann, A., Roucou, P., Fontaine, B. (2011). *Weather regimes in the euro-atlantic and mediterranean sector, and relationship with west african rainfall over the 1989–2008 period from a self organizing maps approach*. J Clim 24:3423–3432.
- Ramsay, H.A., Sobel A.H. (2011). *Effects of relative and absolute sea surface temperature on tropical cyclone potential intensity using a single-column model*. J. Climate, 24, 183–193.
- Reusch, D.B., Alley, R.B., Hewitson, B.C. (2007). *North Atlantic climate variability from a self-organizing map perspective*. J. Geophys. Res. 112, D02104.
- Santer, B. D. and co-authors (2006). *Forced and unforced ocean temperatures changes in Atlantic and Pacific tropical cyclogenesis regions*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 103, 13905-13910.
- Smith, T.M., Reynolds, R.W. (2003). *Extended Reconstruction of Global Sea Surface Temperatures Based on COADS Data (1854-1997)*. Journal of Climate, 16, 1495-1510.
- Vecchi, G.A., Soden, B.J. (2007). *Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity*. Nature, 450, 1066–1070.
- Vecchi, G.A., Swanson, K.L., Soden, B.J. (2008). *Whither hurricane activity?* Science, 322, 687–689.
- Villarini, G., Vecchi G.A., Smith, J.A. (2010). *Modeling the dependence of tropical storm counts in the North Atlantic basin on climate indices*. Mon. Wea. Rev., 138, 2681–2705.
- Villarini, G., Vecchi, G.A. (2012). *Twenty-first-century projections of North Atlantic tropical storms from CMIP5 models*. Nat. Climate Change, 2, 604–607.